International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)
Peer-Reviewed Journal
ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O)
Vol-8, Issue-12; Dec, 2021
Journal Home Page Available: https://ijaers.com/
Article DOI: https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.812.34

Use of the ultrasonic transparency technique to calculate the elastic and physical properties of flat glass

Utilização da técnica ultrassônica da transparência para o cálculo de propriedades elásticas e físicas dos vidros planos

Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior[1], Maurílio José Inácio[2], Maria Helena Teles Lopes[3], Geraldo Dias Pereira Júnior [4], Adalto Soares da Fonseca Júnior[5], Samara Guedes Ramos[6]

[1]Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
[2]Departamento de Ciências da Computação, Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil
[3,4,5,6]Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas, Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil

Received: 14 Nov 2021,

Received in revised form: 11 Dec 2021,

Accepted: 19 Dec 2021,

Available online: 27 Dec 2021

***Keywords*— Glass, Elastic Properties, Ultrasonic.**

Abstract — *The elastic properties of soda lime silicate float glass were analyzed by transmission technique ultrasonic. Four samples of glass in white, smoked and green color were obtained commercially and investigated with ultrasonic velocities at 125 kHz frequency. As a result, properties such as shear modulus, Young's modulus, bulk modulus, Poisson's ratio, microhardness, acoustic impedance, fractal bond connectivity and anisotropy factor were assessed by longitudinal and transverse velocities data and density measurements in the samples. The results were compared with reference values published in the literature attesting the viability of the proposed method.*

I. INTRODUÇÃO

Os vidros planos, também conhecidos como vidros *float*, têm se destacado no mercado da construção civil devido ao aumento das áreas envidraçadas, que é uma tendência na arquitetura moderna. Entretanto, o aumento das áreas envidraçadas tem causado diversos questionamentos sobre a segurança e o aumento da temperatura interna nas edificações, que por sua vez, provoca um maior consumo de energia elétrica com o uso de equipamentos de refrigeração.

O vidro *float* é definido como sendo um vidro de silicato sodacálcico, plano, transparente, incolor ou colorido em sua massa, de faces paralelas e planas, que se obtém por fundição contínua e solidificação no interior de um banho de metal fundido [1]. Além de serem bastante utilizados na construção civil, eles servem como base para a obtenção de diversos tipos de vidros comerciais. As composições químicas dos vidros *float* incolor (*white ou clear glass*), fumê (*smoked ou grey glass*) e verde (*green glass*) são semelhantes e bastante conhecidas, sendo encontradas apenas pequenas variações nos principais elementos constituintes, quais sejam: 68-75% SiO_2, 0-4% Al_2O_3, 6-12,4 % Na_2O, 0-3% K_2O, 10,2-17% CaO e 0-5,5% MgO [2-6].

Geralmente, o vidro plano incolor apresenta baixos percentuais de Fe_2O_3 ou a ausência desse óxido entre os seus principais elementos constituintes. Entretanto, adições percentuais entre 0,25% e 0,65% de Fe_2O_3 podem favorecer a coloração do vidro fumê [4, 6, 7]. Por outro lado, uma coloração esverdeada pode ser obtida mantendo a faixa percentual de Fe_2O_3 e adicionando percentuais em torno de 1% de CeO_2 e 1% de TiO_2 [3]. Além disso,

percentuais entre 0,002% e 0,06% de CrO_2 também são responsáveis pela coloração esverdeada de alguns tipos de vidros [8].

As variedades na coloração do vidro plano permitem o seu uso em situações onde se deseja reduzir a entrada de luz nas edificações, além de controlar a radiação solar, uma vez que parte da radiação será refletida para o ambiente externo e a outra parte será absorvida pelo vidro.

É importante conhecer algumas propriedades dos vidros planos, tais como, resistência à flexão, dureza, resistividade elétrica e absorção óptica. Isto porque, essas propriedades fornecem informações importantes sobre desempenho desses vidros em diferentes situações de uso [9, 10-12]. Contudo, o conhecimento dessas propriedades ainda é insuficiente para caracterizar os vidros planos de forma mais abrangente. Por exemplo, existe uma recomendação normativa para que também sejam realizados ensaios de análise dimensional, resistência ao choque mecânico, resistência ao choque térmico, fragmentação e ensaio de segurança [13].

A maioria dos ensaios mecânicos para caracterização dos vidros planos são destrutivos, ou seja, danificam ou inutilizam as amostras investigadas. Além disso, estes ensaios demandam maior tempo e custo para aquisição dos resultados, devido à necessidade de produzir várias amostras que serão investigadas por diferentes ensaios. Uma alternativa que poderia reduzir o tempo e os custos gerados com ensaios convencionais consiste na utilização de ensaios não destrutivos. Esses ensaios utilizam técnicas capazes de inspecionar e caracterizar um material sem a necessidade de destruí-lo [14].

Os ensaios não destrutivos são bastante utilizados para o estudo das propriedades elásticas dos materiais, sendo o ensaio por ultrassom uma das técnicas mais conhecidas e aplicadas na investigação de vidros [15-17]. A maior vantagem no uso do ensaio por ultrassom está na possibilidade de estimar diversas propriedades elásticas e físicas, que podem ser descritas em função da densidade e dos valores das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas de modo longitudinal e transversal [18]. Este fato evidencia a vantagem no uso do ultrassom, que pode ser utilizado para caracterizar os vidros planos de forma rápida, dispensando a necessidade de realização dos ensaios mecânicos convencionais.

Portanto, com base nos aspectos abordados acima, este estudo buscou desenvolver uma metodologia de ensaio não destrutivo, que utiliza a propagação de ondas ultrassônicas para caracterizar propriedades elásticas e físicas dos vidros planos aplicados em janelas e nos fechamentos dos ambientes internos das edificações.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características das amostras de vidro

Para a realização deste estudo foram adquiridas quatro amostras de vidro de janela, fornecidos por uma vidraçaria comum, sendo uma amostra incolor (IG), uma fumê claro (FN), uma fumê escuro (FI) e outra de coloração esverdeada (VM). Os vidros planos ou do tipo *float*, apresentavam superfícies lisas e livres de falhas ou trincas. A massa dos vidros foi medida com uma balança digital de resolução igual a 0,01 g e suas dimensões foram aferidas com um paquímetro com resolução de 0,005 mm. O volume das amostras foi calculado pelo produto, comprimento (c) x largura (l) x espessura (e). Na Tabela 1 estão apresentadas as dimensões das amostras de vidro, bem como seus respectivos valores de massa e volume.

Tabela. 1: Massa e volume das amostras de vidro

Vidro	Massa (kg)	*c* (m)	*l* (m)	*e* (m)	Volume ($10^{-5}m^3$)
IG	0,207	0,2200	0,1050	0,0036	8,3160
FN	0,191	0,2000	0,0997	0,0036	7,1784
FI	0,195	0,1999	0,0998	0,0037	7,3815
VM	0,193	0,1998	0,1000	0,0035	6,9930

A densidade (ρ) dos vidros foi calculada utilizando a Equação 1, que consiste na razão entre a massa (m_{vidro}) e o volume (V_{vidro}). O valor calculado da densidade foi admitido como uniforme, uma vez que foram consideradas amostras com inércia constante e distribuição de massa homogênea.

$$\rho = m_{vidro}/V_{vidro} \quad (kg/m^3) \qquad (1)$$

2.2 Instrumentação para medidas dos sinais ultrassônicos

Para medir os sinais ultrassônicos propagados através dos vidros foram desenvolvidos dois circuitos eletrônicos, sendo um deles emissor e o outro receptor de sinais. O circuito emissor é constituído por um oscilador, um gerador de pulsos e um amplificador de pulsos. Esse circuito produz pulsos com amplitude de 100 V e duração de 1 μs, em intervalos de tempo iguais a 1 s. Os pulsos aplicados em um transdutor piezoelétrico com diâmetro de 0,02 m, geram ondas ultrassônicas longitudinais com frequência de 125 kHz. O circuito emissor de ondas ultrassônicas possui uma fonte de alimentação que fornece tensões de +5 V, +12 V e +100 V.

O circuito receptor é constituído por um amplificador operacional, um filtro passa-baixa e um filtro passa-alta. Esse circuito amplifica e filtra o sinal captado por outro transdutor piezoelétrico, do mesmo tipo utilizado no

circuito emissor, fornecendo na saída o sinal medido com um osciloscópio utilizado como instrumento externo. A fonte de alimentação desse circuito fornece tensões de +5 V e -5 V. Um osciloscópio digital, da marca Tektronix, modelo TBS1062, foi conectado a um computador para exportação dos dados utilizando o programa OpenChoice Desktop. Dessa forma, foi possível determinar a diferença entre o tempo da onda ultrassônica emitida e recebida.

Na Figura 1 estão apresentados os circuitos eletrônicos, emissor e receptor, utilizados para propagar as ondas ultrassônicas longitudinais através dos vidros investigados. As medidas foram realizadas com os tradutores posicionados nas extremidades dos vidros, conforme ilustra os exemplos nas Figuras 1(a) e (b) para os vidros incolor (IG) e fumê escuro (FI), respectivamente. O mel de abelha foi utilizado como acoplante entre os transdutores e a superfície dos vidros. O tempo de percurso, em microssegundos (μs), entre a onda ultrassônica emitida e recebida através dos vidros, está ilustrado na Figura 2. O comprimento adotado entre os centros dos transdutores foi de 0,18 m, sendo este valor admitido como a distância percorrida pela onda ultrassônica através das amostras.

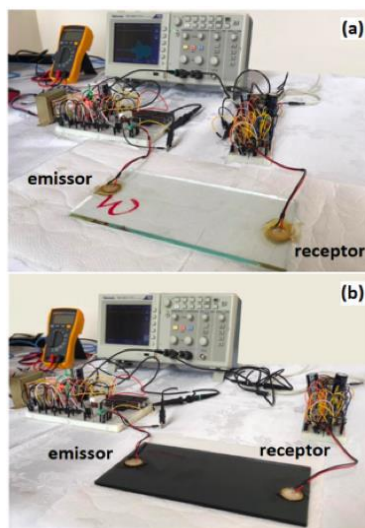


Fig. 1: Circuitos eletrônicos emissor e receptor de ondas ultrassônicas: (a) medidas no vidro incolor e (b) no vidro fumê escuro

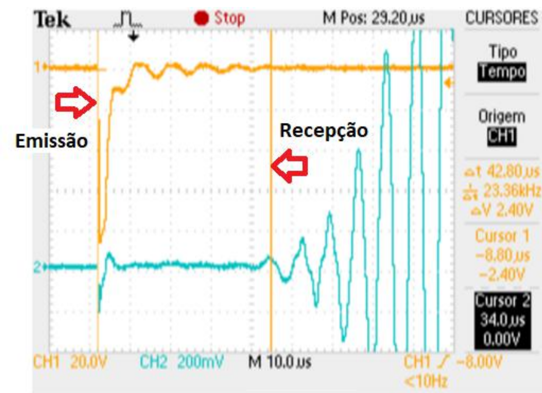


Fig. 2: Determinação do tempo de percurso da onda ultrassônica através dos vidros utilizando o programa OpenChoice Desktop

A velocidade de propagação da onda longitudinal (V_L) foi calculada utilizando a Equação 2, que representa a razão entre a distância percorrida pela onda ultrassônica (c) e o tempo de percurso (t). O valor de V_L foi obtido a partir da média de três medidas reprodutíveis, que foram realizadas com a remoção e o reposicionamento dos transdutores nas extremidades dos vidros.

$$V_L = c/t \quad \text{(m/s)} \qquad (2)$$

Para estimar o valor da velocidade transversal (V_T) foram analisadas as relações existentes entre V_L e V_T para diferentes tipos de vidros. Para os vidros sodacálcicos, a razão entre V_T e V_L está em torno de 0,60 [5, 7, 19]. Este resultado também é observado em vidros de telúrio, de chumbo, de zircônia ou de boro, e também em vidros de sílica fundida [17, 19-21]. Portanto, a partir da velocidade longitudinal (V_L) foi estimada a velocidade da onda ultrassônica transversal (V_T) por meio da Equação 3.

$$V_T = 0{,}60 V_L \qquad (3)$$

2.3 Cálculo das propriedades dos vidros

Nos vidros isotrópicos algumas propriedades elásticas, tais como, os módulos de elasticidade (E), cisalhamento (G), compressibilidade (B) e o coeficiente de Poisson (v), podem ser descritas em função do valor da densidade (ρ) e das velocidades ultrassônicas de modo longitudinal (V_L) e transversal (V_T) [20-22]. Entre as propriedades físicas que podem ser estimadas com ondas ultrassônicas destacam-se: o coeficiente de expansão térmica (α), a impedância acústica (Z), a microdureza (H), o fator de anisotropia (A) e o parâmetro *fractal bond connectivity* (F), que relaciona as propriedades elásticas dos vidros à sua estrutura atômica [15, 17, 23-27]. Assim, as propriedades elásticas e físicas foram avaliadas utilizando as equações apresentadas na Tabela 2.

Tabela. 2: Propriedades dos vidros em função das velocidades ultrassônicas

N°	Propriedade	Equação
4	Módulo de elasticidade (*GPa*)	$E = \rho V_T^2 \left(\frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2} \right)$
5	Módulo de cisalhamento (*GPa*)	$G = \rho V_T^2$
6	Módulo de compressibilidade (*GPa*)	$B = \rho \left(\frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{3} \right)$
7	Coeficiente de Poisson	$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2(V_L^2 - V_T^2)}$
8	Microdureza (*GPa*)	$H = \frac{(1-2\nu)E}{6(1+\nu)}$
9	Coeficiente de expansão térmica (K^{-1})	$\alpha = 23{,}2(V_L - 0{,}57457)$
10	Impedância acústica ($kg.m^{-2}s^{-1}$)	$Z = \rho V_L$
11	*Fractal bond connectivity*	$F = \frac{4G}{B}$
12	Anisotropia elástica	$A = \left(\frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}} \right)$

Para o cálculo da anisotropia as constantes elásticas apresentadas na Equação 12 podem ser descritas em função das velocidades ultrassônicas e da densidade dos vidros, em que: $C_{11} = \rho V_L^2$, $C_{44} = \rho V_T^2$ e $C_{12} = C_{11} - 2C_{44}$ [18].

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades elásticas das amostras de vidro

Na Tabela 3 estão as propriedades elásticas obtidas com as Equações de 4 a 7. Analisando os resultados nota-se que os módulos de elasticidade (*E*), cisalhamento (*G*) e compressibilidade (*B*), são um pouco menores para o vidro incolor (IG), quando comparados com os valores encontrados para os vidros fumê claro (FN), fumê escuro (FI) e verde (VM). Os valores das propriedades *E*, *G* e *B*, sugerem que o vidro incolor apresenta uma menor rigidez às deformações longitudinal, transversal e volumétrica, respectivamente. Este fato pode estar associado, sobretudo, aos baixos percentuais ou à ausência dos elementos Fe_2O_3 e Cr_2O_3 nos vidros incolores, cujas concentrações desses elementos são maiores nos vidros fumê e verde, respectivamente [4, 6, 8, 28].

Com exceção do coeficiente de Poisson (*v*), os valores encontrados de *E*, *G* e *B* foram inferiores àqueles relatados na literatura para os vidros sodacálcicos comerciais. Um estudo realizado em vidros sodacálcicos com baixos percentuais de Fe_2O_3 e com ausência de ZnO, revelou que os valores das propriedades elásticas podem apresentar algumas variações. Por exemplo, o módulo *E* pode variar entre 70,70 GPa e 75,60 GPa, o módulo *G* entre 29,40 GPa e 31,20 GPa, e o módulo *B* entre 39,50 GPa e 43,90 GPa [6]. Para o coeficiente *v* são encontrados valores entre 0,20 e 0,22 [6]. Portanto, os resultados apresentados na Tabela 3 indicam que as amostras possuem propriedades elásticas inferiores aos dos vidros sodacálcicos com baixos percentuais de Fe_2O_3 e ausência de ZnO.

A presença do ZnO pode influenciar na velocidade de propagação ultrassônica, na densidade e em algumas propriedades dos vidros sodacálcicos [7]. Por exemplo, em vidros sodacálcicos com ausência de ZnO o valor de V_L está torno de 4956 m/s, mas com adições de 5% e 39% desse óxido, o valor de V_L diminui para 4836 m/s e 3541 m/s, respectivamente [5]. Assim, os valores mais baixos de V_L encontrados nas amostras podem estar associados a presença do ZnO em suas composições.

No que se refere a densidade, em geral, o vidro sodacálcico apresenta densidade em torno de 2500 kgf/m^3 [29]. Entretanto, adições de ZnO influenciam nas variações percentuais nos principais elementos químicos, resultando em valores de densidade entre 2522 kgf/m^3 e 2738 kgf/m^3 [30]. Por outro lado, a utilização de Cr_2O_3 para a obtenção da coloração esverdeada também aumenta a densidade dos vidros para valores próximos a 2765 kgf/m^3 [28].

Tabela. 3: Propriedades E, G, B e v para os vidros

Vidro	ρ (kg/m^3)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	*E* (GPa)	*G* (GPa)	*B* (GPa)	*v*
IG	2489,18	4736,84	2842,10	49,01	20,11	29,04	0,22
FN	2660,76	4639,18	2783,51	50,25	20,62	29,78	0,22
FI	2641,74	4687,50	2812,50	50,90	20,90	30,18	0,22
VM	2759,90	4591,84	2755,10	51,06	20,95	30,26	0,22

Sabendo que a adição do ZnO altera os valores das velocidades ultrassônicas e da densidade, fica claro que a presença do ZnO também interfere no valor das propriedades elásticas dos vidros. Por exemplo, para vidros sodacálcico com composição química de 55,4%SiO_2, 2,1%Al_2O_3, 10,2%Na_2O, 1,1%K_2O, 9,1%CaO, 1,7%MgO, e 19,7%ZnO, podem ser encontrados valores de E = 51,17 GPa, G = 20,41 GPa e B = 34,57 GPa [5, 7]. Logo, diferente dos resultados apresentados anteriormente para vidros sodacálcicos com baixos percentuais de Fe_2O_3 e com ausência do ZnO, estes valores são semelhantes aos resultados apresentados na Tabela 3. Ressalta-se ainda que a perda nas propriedades elásticas com a adição ZnO é mais acentuada para percentuais em torno de 38,9%. Como consequência, as propriedades elásticas diminuem consideravelmente para E = 25,96 GPa, G = 9,61 GPa e B = 28,71 GPa [5, 7].

Os vidros com ZnO geralmente são obtidos a partir da mistura de garrafas moídas, que são homogeneizadas com ZnO na forma particulada para posterior fundição e moldagem [7]. Além da obtenção de vidros sodacálcicos a partir da reciclagem de garrafas, outra finalidade na adição do ZnO está no aumento da absorção óptica [9]. Dessa forma, analisando os valores de densidade e das propriedades elásticas apresentadas na Tabela 3, acredita-se que as amostras investigadas no presente estudo possam apresentar percentuais de ZnO em sua composição. Contudo, é importante destacar que essa hipótese está fundamentada nos relatos encontrados na literatura sobre a composição química geral dos vidros sodacálcicos incolor, fumê e verde, e apenas pode ser comprovada por meio de uma análise química dos elementos constituintes das amostras.

Os valores das propriedades elásticas E, G e B obtidos nas amostras também são semelhantes àqueles observados em alguns vidros comerciais a base de telúrio (ZnO-AlF_3-TeO_2) com adição do ZnO. Por exemplo, em vidros de telúrio com 25% de ZnO podem ser observados valores de E = 50,60 GPa, G = 20,51 GPa e B = 31,64 GPa [20].

3.2 Propriedades físicas das amostras de vidro

Na Tabela 4 encontram-se as propriedades físicas das amostras calculadas com as Equações de 8 a 11. De maneira geral, os valores de microdureza (H) representam a resistência à deformação plástica dos vidros. O vidro incolor (IG) apresentou o menor valor de microdureza (H = 3,749 GPa), enquanto que o maior valor foi observado no vidro verde (VM) (H = 3,906 GPa). Para os vidros fumê claro (FN) e fumê escuro (FI) foram encontrados valores intermediários de H = 3,844 GPa e H = 3,894 GPa, respectivamente.

Comparando a microdureza com as propriedades elásticas, nota-se que H cresce com os valores de E, G e B. Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que a microdureza geralmente é maior nos vidros com maior rigidez, sendo esse comportamento uma tendência observada não apenas nos vidros sodacálcicos, mas também em outros tipos de vidro [7, 16, 21, 25]. Na Figura 3 estão apresentados os valores das propriedades elásticas E, G e B em função dos valores de H. No resultado é possível constatar que as propriedades elásticas aumentam linearmente com o aumento da microdureza, conforme observado pelos valores dos coeficientes de correlação linear (R^2) que estão próximos de 1.

Tabela. 4: Propriedades físicas H, α, Z e F dos vidros

Vidro	H (GPa)	α ($10^5 K^{-1}$)	Z (10^6 kgm^{-2}/s)	F	A
IG	3,749	1,099	11,790	2,770	1,039
FN	3,844	1,076	12,344	2,769	1,039
FI	3,894	1,087	12,383	2,770	1,039
VM	3,906	1,065	12,673	2,769	1,039

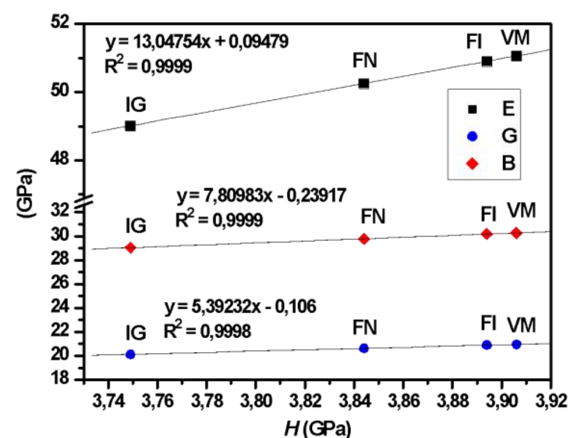


Fig. 3: Propriedades elásticas E, G e B em função de H

A Equação 9 pode ser utilizada para calcular o valor do coeficiente de expansão térmica (α) dos vidros em K^{-1} [25]. Os valores calculados de α representam a variação das dimensões dos vidros em relação às dimensões iniciais a cada K (Kelvin) de variação térmica. Neste caso, o vidro incolor (IG) com valor de α_{IG} = 1,099 x $10^5 K^{-1}$ será mais expansivo, enquanto que o vidro verde (VM), com α_{VM} = 1,065 x $10^5 K^{-1}$, deverá ter suas dimensões menos influenciadas com elevações de temperatura. Dessa forma, os vidros fumê claro (FN) e fumê escuro (FI) devem apresentar expansibilidades térmicas intermediárias entre as dos vidros incolor (IG) e verde (VM), considerando os

valores de α_{FN} = 1,076 x $10^5 K^{-1}$ e α_{FI} = 1,087 x $10^5 K^{-1}$, respectivamente. Os coeficientes de expansão térmica calculados para os vidros de janela estão próximos do valor médio encontrado em vidros de boro dopados com diferentes percentuais de chumbo (Na_2CO_3-PbO-B_2O_3), que é de α = 1,1 x $10^5 K^{-1}$ [25]. Adicionalmente, nos vidros de boro, a substituição do Pb por diferentes percentuais de ZnO aumenta o valor médio do coeficiente de expansão térmica para α = 1,2 x $10^5 K^{-1}$ [25].

A impedância acústica (*Z*) pode ser compreendida como sendo a oposição à passagem das ondas sonoras através de um material [31]. Na Tabela 4 nota-se que os valores *Z* são maiores para os vidros com maior valor de *H*. Entretanto, os valores de *Z* não apresentam de forma clara uma relação com os coeficientes α. Esse comportamento pode ser mais bem observado analisando os dados apresentados na Figura 4.

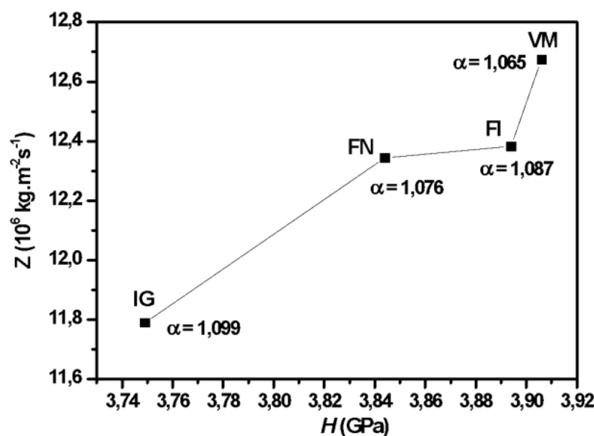


Fig. 4: Valores de Z e α em função de H

Em alguns vidros sodacálcicos os valores de *Z* crescem com os valores de *H*, que por sua vez está associado ao aumento dos módulos *E* e *G* [27]. Esta tendência concorda com os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4 para as amostras. Entretanto, outros autores observaram um comportamento diferente nos vidros de boro dopados com ZnO (Na_2CO_3-ZnO-B_2O_3), não sendo constatadas relações entre os valores de *Z* e *H* [25].

Embora os vidros de janela não tenham apresentado uma relação clara entre os valores de α e *H*, em vidros de boro e lítio, contendo diferentes concentrações de K_2O e CaO, observa-se uma tendência no aumento dos valores de *Z* e α com o crescimento dos valores de *H* [15]. Logo, o crescimento de *Z* e α com o aumento de *H*, parece ser muito dependente da presença de alguns elementos na composição química dos vidros.

O parâmetro *fractal bond connectivity* (*F*) pode fornecer informações sobre as relações existentes entre as propriedades do vidro e a sua estrutura atômica. No estudo dos vidros, quando *F* = 3, admite-se uma estrutura constituída de poliedros de coordenação tetraédrica em três dimensões. Para *F* = 2, os poliedros de coordenação tetraédrica estão em duas dimensões e de forma unidimensional para *F* = 1 [23]. Todos os valores calculados foram próximos de 3, indicando que as amostras possuem uma estrutura com tendência de poliedros de coordenação tetraédrica em três dimensões.

Em alguns vidros sodacálcicos os valores de *E*, *G* e *H* diminuem com o valor do parâmetro *F* [32]. Um comportamento semelhante foi observado em vidros de boro e lítio, sendo também relatada uma diminuição nos valores de α para menores valores de *F* [15]. Este resultado concorda com os dados apresentados na Figura 5, onde é possível perceber o comportamento entre α e *F* para as amostras.

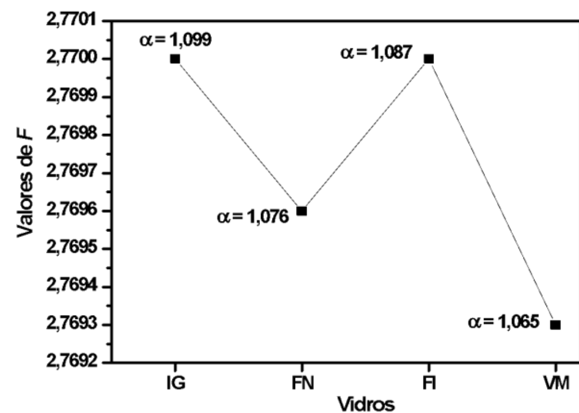


Fig. 5: Relação entre α e F nos vidros de janela

Os valores de anisotropia elástica (*A*) em torno de 1 indicam, teoricamente, que o material não apresenta variações nas propriedades elásticas em função da direção investigada [26, 33]. Neste caso, os valores calculados de *A* = 1,039 para todas as amostras sugerem características isotrópicas. A anisotropia elástica é um importante parâmetro para a caracterização dos vidros planos, pois ao contrário do que se pensa, muitos vidros não são isotrópicos [34].

IV. CONCLUSÃO

Nesse estudo, os resultados encontrados para os módulos de elasticidade (*E*), cisalhamento (*G*) e compressibilidade (*K*), indicaram que os vidros planos podem conter em suas composições químicas a presença

do ZnO, que em determinados percentuais interferem nas propriedades elásticas reduzindo a rigidez. O resultado calculado para o coeficiente de Poisson (*v*) foi o mesmo para todos os vidros, estando dentro da faixa de valores esperados para os vidros sodacálcicos.

A possibilidade da presença do ZnO na composição química dos vidros planos foi levantada após analisar os resultados de *E*, *G* e *K*, que são inferiores aos valores geralmente obtidos nos vidros sodacálcicos sem adição de ZnO, mas semelhantes àqueles encontrados nos vidros sodacálcicos com percentuais de ZnO em torno de 20%. Outros indicativos que reforçam essa hipótese são os menores valores calculados de V_L e o aumento da densidade, cujas características são esperadas nos vidros sodacálcicos com ZnO.

Os resultados de microdureza (*H*) foram maiores nos vidros com maior valor de impedância acústica (*Z*) e maior rigidez, sendo esse comportamento uma tendência observada, não apenas nos vidros sodacálcicos, mas também em outros tipos de vidro. Por outro lado, o coeficiente de expansão térmica linear (α) foi maior nos vidros, cuja estrutura é formada por poliedros de coordenação tetraédrica em três dimensões. Para todos os vidros foram encontrados um valor de anisotropia (*A*) em torno de 1, indicando que os vidros apresentam características isotrópicas.

A proximidade dos resultados calculados com os valores de referência, associado a um método simples e rápido, atestam a viabilidade de utilização do método ultrassônico da transparência como técnica não destrutiva para caracterização de propriedades elásticas e físicas dos vidros planos.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS), pela utilização da infraestrutura e equipamentos.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT NBR NM 294. (2004). *Vidro float*. Norma Mercosur.

[2] Buckett, J.; Marsh, J. S.; Torr, A. C. (2002). *Soda-lime-silica glass compositions*. World Intellectual Property Organization, International Publication Number (WO 02/16277 A1).

[3] Boulos, E. N., & Jones, J. V. (2006). *Green Glass Composition*. United States Patent, US 7,094,716 B2.

[4] Teyssedre, L., & Jeanvoine, P. (2007). *U.S. Patent No. 7,179,763*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[5] Zaid, M. H. M., Matori, K. A., Wah, L. C., Sidek, H. A. A., Halimah, M. K., Wahab, Z. A., & Azmi, B. Z. (2011). Elastic moduli prediction and correlation in soda lime silicate glasses containing ZnO. *International Journal of Physical Sciences*, *6*(6), 1404-1410.

[6] Kilinc, E., & Hand, R. J. (2015). Mechanical properties of soda–lime–silica glasses with varying alkaline earth contents. *Journal of non-crystalline solids*, *429*, 190-197.

[7] Matori, K. A., Zaid, M. H. M., Sidek, H. A. A., Halimah, M. K., Wahab, Z. A., & Sabri, M. G. M. (2010). Influence of ZnO on the ultrasonic velocity and elastic moduli of soda lime silicate glasses. *International Journal of Physical Sciences*, *5*(14), 2212-2216.

[8] Al-Shamiri, H. A. S., & Eid, A. S. (2012). Optical and ultrasonic properties of chromium oxide in sodium zinc phosphate glass. *Photonics and Optoelectronics*, *1*(1), 1-8.

[9] Zaid, M. H. M., Matori, K. A., Abdul Aziz, S. H., Zakaria, A., & Mohd Ghazali, M. S. (2012). Effect of ZnO on the physical properties and optical band gap of soda lime silicate glass. *International journal of molecular sciences*, *13*(6), 7550-7558. doi:10.3390/ijms13067550

[10] Malou, Z., Hamidouche, M., Bouaouadja, N., Chevalier, J., & Fantozzi, G. (2013). Thermal shock resistance of a soda lime glass. *Ceramics–Silikáty*, *57*(1), 39-44.

[11] Hasanuzzaman, M., Rafferty, A., Sajjia, M., & Olabi, A. G. (2016). Properties of glass materials. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1-12.

[12] Kupriyanov, V., & Sedova, F. (2020, July). Energy method for calculating insolation of residential apartments. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 890, No. 1, p. 012038). IOP Publishing.

[13] ABNT NBR 14698. (2001). *Vidro Temperado*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[14] Garcia, A., Spim, J. A. & Santos, C. A. (2014). *Ensaio dos materiais*. Rio de Janeiro: LTC.

[15] Palani, R., & Selvarasi, J. (2017). Elastic and structural properties of potassium and calcium–doped borate lithium glasses. *Int J Curr Res Rev*, *9*, 71-79.

[16] Suebsing, N., Chutithanapanon, N., Juntarat, P., Laopaiboon, R., & Bootjomchai, C. (2018, December). An investigation of structural and elastic properties of soda-lime glasses doped with rare earth oxide. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1144, No. 1, p. 012129). IOP Publishing.

[17] Moya, B. R., Reis, I. C. D., Reynoso, V. C. S., Barros, M. D. S., & Gomes, K. R. S. (2020). Ultrasonic measurement and elastic properties of the PbO-SrO-B_2O_3 glass system. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, *13*.

[18] Eraiah, B., Geetha, D., & Anavekar, R. V. (2008). Elastic properties of lead-phosphate glasses doped with erbium trioxide. *Canadian Journal of Physics*, *86*(11), 1349-1352.

[19] Ginzel, E., & Turnbull, B. (2016). Determining approximate acoustic properties of materials. *NDT. net Dec*. Recuperado de http://www.ndt.net/?id=20452

[20] Sidek, H. A. A., El-Mallawany, R., Hariharan, K., & Rosmawati, S. (2014). Effect of concurrent ZnO addition and AlF_3 reduction on the elastic properties of tellurite based glass system. *Advances in Condensed Matter Physics*, *2014*.

[21] Wu, S. J., Chin, P. C., & Liu, H. (2019). Measurement of elastic properties of brittle materials by ultrasonic and indentation methods. *Applied Sciences, 9*(10), 2067.

[22] Kumar, A., Jayakumar, T., Raj, B., & Ray, K. K. (2003). Correlation between ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials. *Acta materialia, 51*(8), 2417-2426.

[23] Budi, A. S., Hussin, R., & Sahar, M. R. (2002). Study of Fractal Bond Connectivity of Neodymium Phosphate Glasses by Ultrasonic Technique. *Jurnal Teknologi, 37*(C), 11-20.

[24] El-All Abd, N. S., Afifi, H. A. (2009). Structure and Ultrasonic Properties of Vanadium Tellurite Glasses Containing Copper Oxide. *Achives of Acoustics, 34*(4), 641-654.

[25] Kannappan, A. N., Thirumaran, S., & Palani, R. (2009). Elastic and mechanical properties of glass specimen by ultrasonic method. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 4*(1), 27-31.

[26] Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (2009). *Mechanical behavior of materials* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.

[27] Jaichueai, Y., Bootjomchai, C., Laopaiboon, J., & Laopaiboon, R. (2017). Elastic properties of recycled soda-lime glasses doped with copper (I) oxide (Cu_2O) studied by ultrasonic technique and fourier transform infrared spectroscopy. *Sciences and Technology Journal, 19*(3), 119-128.

[28] Kaewkhao, J., & Limsuwan, P. (2012). Utilization of rice husk fly ash in the color glass production. *Procedia Engineering, 32*, 670-675. doi:10.1016/j.proeng.2012.01.1325

[29] Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução* (8th ed.) Rio de Janeiro: LTC. p. 919.

[30] El-Din, F. E., El-Alaily, N. A., & El-Batal, H. A. (1992). Density and refractive index of some γ-irradiated alkali silicate glasses. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 163*(2), 267-275.

[31] Krautkramer, J. & Krautkramer, H. (1990). *Ultrasonic testing of materials* (4th ed.) Berlin: Springer-Verlag.

[32] Lee, C. S., Amin Matori, K., Ab Aziz, S. H., Kamari, H. M., Ismail, I., & Mohd Zaid, M. H. (2017). Comprehensive study on elastic moduli prediction and correlation of glass and glass ceramic derived from waste rice husk. *Advances in Materials Science and Engineering, 2017*. https://doi.org/10.1155/2017/8962986

[33] Ledbetter, H. M., & Reed, R. P. (1973). Elastic properties of metals and alloys, I. Iron, nickel, and iron-nickel alloys. *Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2*(3), 531-618.

[34] Zanotto, E. D., & Mauro, J. C. (2017). The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. *Journal of Non-Crystalline Solids, 471*, 490-495. http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.019